

Grootte is belangrijk

De voors en tegens

De auteurs van dit artikel zijn afkomstig van Stanford University. Zij bekijken de implicaties van de miniaturisatie en in hoeverre de fabricagetechnieken van micro-elektronica bepalend zijn op productgebieden als turbomachines en brandstofcellen. Het mag dan paradoxaal klinken, maar miniaturisatie speelt een steeds belangrijkere rol in ons leven. Pc's, telefoons, PDA's en consumer elektronica nemen in grootte continu af. Het gaat bovendien steeds sneller: submicronfabricage heeft geleid tot werkfrequenties waarvan we een aantal jaren geleden alleen nog maar konden dromen. Echter, naast de belofte van enorme voordelen kent miniaturisatie ook haar prijs, zoals bijvoorbeeld een lagere nauwkeurigheid en een verhoogd risico voor wrijvingsverliezen.

• Sankyun Kang, Sang-Joon J. Lee, Frits B. Prinz ABB Group •

De afgelopen jaren lieten zien dat ideeën vanuit de miniatuurwereld enthousiast door andere disciplines werden overgenomen. Een goed voorbeeld hiervan ligt op het gebied van MEMS (Micro Elektronic Mechanical Systems). Deze systemen spreken de bestaande micro-fabricagetechnieken aan om te komen tot de creatie van miniatuursensoren (bijvoorbeeld versnellingsensoren) en microactuatoren (kleppen en mirror arrays). Een groot voordeel van MEMS is dat dergelijke eenheden op een relatief eenvoudige manier parallel kunnen worden aangebracht, waardoor de productbetrouwbaarheid toeneemt. Er is echter een keerzijde, op het moment dat de grootte afneemt ontstaat er verlies aan nauwkeurigheid en gaan de wrijvingsverliezen omhoog. Met deze nadelen in gedachte is het de moeite waard om de implicaties van MEMS-fabricage eens nader onder de loep te nemen. Er zijn twee gebieden waar MEMS en andere precisiefabricage-

technieken reeds hun stempel op hebben gedrukt en die bovendien de genoemde implicaties duidelijk aantoonbaar maken: micromotoren en micro-brandstofcellen

Implicaties van schaalgrootte voor turbomachines

Een mechanisch systeem kan worden beschreven door zijn massa m , afstand d , grootte l en tijd t . Teneinde het gedrag van grote systemen te vergelijken met hun veel kleiner uitgevallen tegenhangers is het noodzakelijk om een aantal aannames te maken. Er wordt bijvoorbeeld aangenomen dat de potentiële energiedichtheid, $U(d,d)$, en de materiaaldichtheid, r , constant zijn. Bovendien wordt aangenomen dat iedere verandering in de toekomstige grootte l , die gerelateerd is aan de massa als $m=\beta$, eveneens vergezeld gaat van een verandering in de

van miniaturisering

afstandsparameter d . Nemen we deze aannames mee in onze afwegingen dan kunnen we kijken naar de effecten die ontstaan bij het verkleinen van een turbine.

De nettohoeveelheid aan energiedichtheid die onder een stabiele toestand naar de as van een turbomachine wordt overgebracht, zonder rekening te houden met zwaartekracht en entropische verliezen, kan geschreven worden in de vorm van een energie (kinetisch en potentieel) vergelijking:

$$1/\rho(v_2^2 - v_1^2) + p_2 - p_1 = E/V$$

$v_{1,2}$ staat voor de snelheid van de vloeistof aan de in- en uitgang van de turbine. De potentiële energiedichtheid $p_2 - p_1$ bevat geen enkele parameter die afhankelijk is van de grootte van de turbomachine. Dit leidt tot het belangrijke resultaat dat *de lengte en tijd (periode) proportioneel zijn*. Een voorbeeld: als een gasturbine kleiner wordt gemaakt (verkorte lengte) zal deze sneller gaan draaien (verkorte periode), waarbij wordt aangenomen dat de energiedichtheid van het gas hetzelfde blijft. Hoewel deze analyse zeer vereenvoudigd is (het negeert verliezen en rendement), geeft het een bruikbaar inzicht betreffende grootte en vermogensdichtheid, zoals hieronder wordt aangetoond

Het dynamische gedrag van turbomachines kan door wiskundige relaties tussen de rotordiameter D en het toerental N worden beschreven. Dimensionale analyse [1] geeft het gegenereerde koppel van een turbine:

$$L = c_1 \rho D^5 N^2$$

Dus het gegenereerde vermogen wordt gedefinieerd als:

$$P = L N = c_1 \rho D^5 N^3$$

Tot hier wordt de vermogensdichtheid in termen van volume gedefinieerd als:

$$P = P/V = c_2 (D^5 N^3 / D^3) = c_2 D^2 N^3$$

Dit laat zien dat de vermogensdichtheid van een turbomachine afhankelijk is van D en N . Houden we de opper-

vlaktesnelheid gelijk en gebruiken we de proportionele relatie tussen lengte en tijd, zoals eerder beargumenteerd, dan blijft $D \times N$ constant. Dienovereenkomstig wordt de vermogensdichtheid:

$$P = c_2 D^2 N^3 = c_2 (D \times N)^3 / D = c_2 (c_3)^3 / D = c_4 / D$$

Dit impliceert dat de vermogensdichtheid van een turbomachine toeneemt als zijn grootte afneemt. Een overeenkomstige argumentatie is mogelijk voor de stuwdruk opwekkende gasturbinemotoren. Afbeelding 1 [2] toont de relatie tussen dichtheid en lengteschaal voor de commerciële straalmotoren van Pratt and Whitney. De helling van de lijn (-0,94) is vergelijkbaar met de voorspelde waarde van -1.

Tevens kan worden aangetoond dat de maximale lineaire snelheid van de top van een rotorblad wordt bepaald door de sterkte van het rotormateriaal en dat het constant houden van de oppervlaktesnelheid voor turbomachines op verschillende schaalgrootte een goed idee is. De maximale waarde van $D \times N$ is dan constant voor twee rotors van verschillende grootte maar wel van dezelfde vorm en materiaal. De constante oppervlaktesnelheid van de rotor impliceert een zelfde stromingssnelheid in de turbomachine. De snelheid van de bladtop is wederom gelijk voor turbomachines met verschillende diameters.

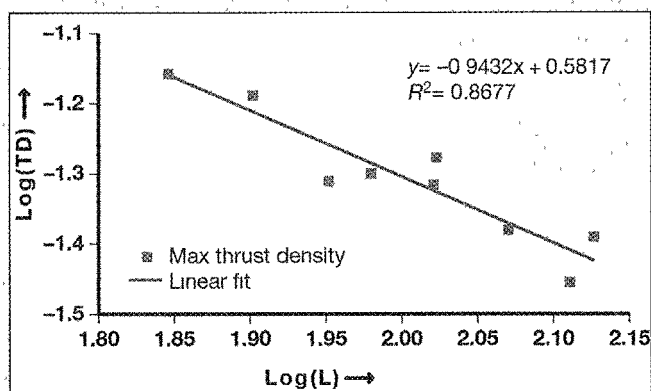
Betrouwbaarheid en groots opgezette parallelle mechanische systemen

De verhoging van de vermogensdichtheid van kleine mechanische systemen leidt tot de mogelijkheid tot groots opgezette parallelle mechanische systemen (MPMS – Massively Parallel Mechanical Systems). Een dergelijke aanpak heeft belangrijke voordelen voor wat betreft grootte en betrouwbaarheid. Als voorbeeld kunnen we nemen dat één grote motor kan worden vervangen door een aantal kleinere motoren. Omdat de vermogensdichtheid van een kleine motor groter is dan die van een grote motor kan de eerstgenoemde hetzelfde vermogen leveren met een lager volume (afbeelding 2). Afbeelding 3 vergelijkt de waarschijnlijkheid van een storing van een grote motor met het in afbeelding 2 geïllustreerde redundante systeem.

Bezwaren van evenredige verkleining van mechanische systemen

Traditionele fabricageprocessen, zoals boren, draaien en moulding, bereiken relatieve nauwkeurigheden die liggen in de orde van 10^{-4} tot 10^{-6} . Relatieve nauwkeurigheid wordt gedefinieerd als de fabricageprocestolerantie Δ/l gedeeld door de karakteristieke onderdeeldimensie l . Deze laatste zal beduidend afnemen als de afmetingen van het onderdeel krimpen.

Moderne microfabricagemethoden, zoals reactieve ionenetching (RIE – Reactive Ion Etching) realiseren een Δ/l van slechts 10^{-2} tot 10^{-4} en de manipulatie van individuele atomen of moleculen met AFM-probes kunnen op z'n best waarden voor Δ/l in de orde van grootte van $0,5 - 10^{-2}$ bereiken. De lagere relatieve nauwkeurigheid bij kleinere afmetingen vormt een grote zorg in mechanische systemen waarbij onderdelen relatief ten opzichte van elkaar worden bewogen. Een ruw oppervlak kan een verhoogde wrijving en warmteopwekking veroorzaken. Dit leidt weer tot de afname van het rendement en een kortere levensduur van kleinschalige systemen.

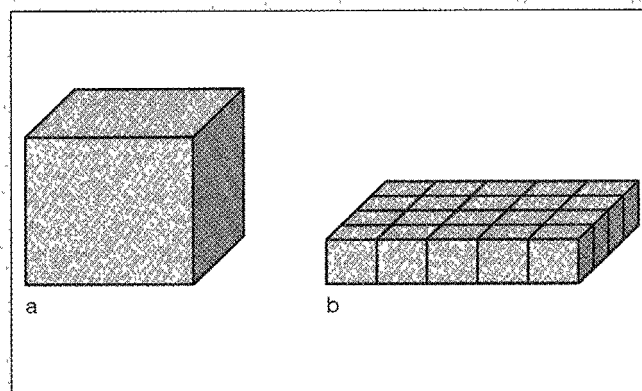


Afbeelding 1. De relatie tussen stuwdrumdichtheid (TD) en lengte (L) van een commerciële straalmotor van Pratt and Whitney.

Mould vormdepositiefabricage van turbomachines

Mould Shape Deposition Manufacturing (Mould SDM) is een tweetraps fabricageproces dat gebruikt kan worden voor het verkrijgen van keramische, metalen en kunststof onderdelen. Een vluchtig mould van was wordt als eerste door gebruikmaking van een zogenoemde additief subtractief fabricageproces (zie afbeelding 4 stappen 1 tot en met 4) opgebouwd. Een veelheid aan gietbare materialen, inclusief keramische en metaal gelachtige suspensies evenals gietbare thermohardende polymeren kunnen vervolgens in de verkregen vorm worden gegoten (stap 6). Na het verwijderen van de gietvorm (stap 7) worden verscheidene nabewerkingen uitgevoerd, zoals het verwijderen van overbodige bestanddelen. Tenslotte wordt het te realiseren onderdeel verkregen (stap 8). Het zogenoemde sinteren kan worden gedaan na de stappen 7 of 8 [4].

Mould SDM kent enkele voordelen ten opzichte van andere fabricageprocessen. Omdat het hierbij gaat om een proces dat in lagen werkt, kan deze methode worden ingezet voor het verkrijgen van complexe vormen en in tegenstelling tot de meeste van dergelijke – puur additieve – methoden gaat het om een additief-subtractief pro-



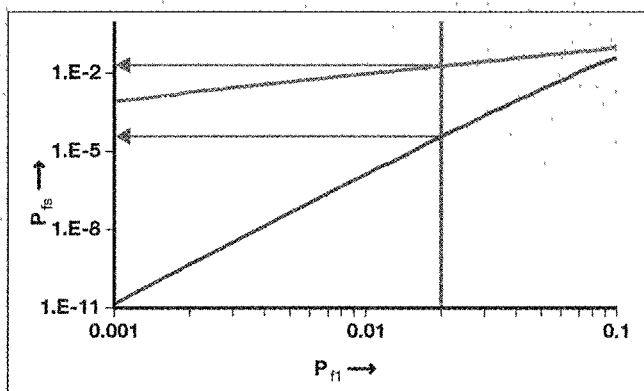
Afbeelding 2. Een enkelvoudig motorsysteem (a) en een redundant systeem (b) met twintig kleine motoren. Eén grote motor wordt vervangen door een factor vier kleinere motoren. Omdat de vermogensdichtheid van de kleinere motoren viermaal hoger ligt, zal het parallelle systeem hetzelfde vermogen leveren met een kwart van het volume. De aldus bespaarde ruimte wordt gebruikt om als extra's vier kleine motoren toe te voegen om de betrouwbaarheid van het systeem te verhogen.

ces. De substractiestap, verkregen door CNC-frezen, stelt ons in staat om mooie, gladde en nauwkeurige vormen te creëren. Mould SDM is bovendien in staat om onderdelen die uit uiteenlopende gietbare materialen bestaan te vervaardigen.

Mould SDM heeft voor het fabriceren van complexe keramische onderdelen twee belangrijke voordelen ten opzichte van andere in lagen werkende fabricageprocessen. Ten eerste zijn alle oppervlakken ofwel bewerkte of gereproduceerde bewerkte oppervlakken. Dit resulteert in gladde, nauwkeurige oppervlakken zonder een enkele vorm van drempel-effecten. Ten tweede bestaat het materiaal van het onderdeel uit monolithisch gietsel. Er zijn met andere woorden geen potentiaal defect opleverende grenslagen in het eindproduct. Deze voordelen zijn vooral van belang voor gietfout gevoelige materialen, waarbij oppervlakterutheid en interne defecten de materiaalsterkte aanzienlijk kunnen reduceren.

Mould SDM en de miniaturturbine

Afbeelding 5 toont een metalen microgasturbine die door M-DOT Aerospace, Arizona, USA is ontworpen en



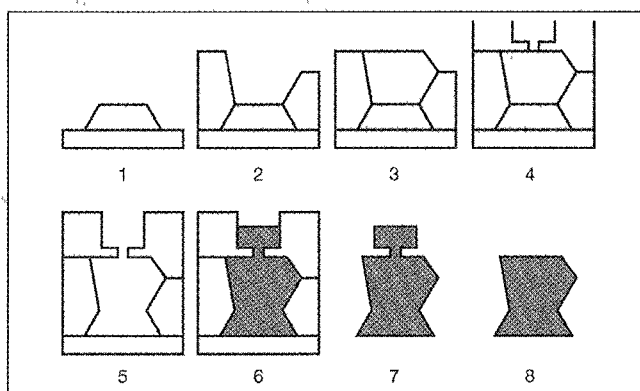
Afbeelding 3. De vergelijking voor de storingswaarschijnlijkheid van een systeem bestaande uit een grote motor (groene lijn) en twintig kleine motoren (paarse lijn). Aannemend dat de storingswaarschijnlijkheid van elke machine ligt op 2×10^{-2} , zal de storingswaarschijnlijkheid voor elke motor afzonderlijk liggen op 2×10^{-2} , maar bedraagt $3,8 \times 10^{-5}$ voor het redundante systeem.

P_{f1} Storingswaarschijnlijkheid voor iedere machine.

P_{f2} Storingswaarschijnlijkheid van een systeem met twintig motoren.

geproduceerd. De vervanging van de metalen onderdelen door keramische onderdelen met als reden de lagere dichtheid en de hogere temperatureigenschappen van het keramische materiaal resulteert in een betere stuw-druk/massaverhouding en een beter rendement. De volgende versie van deze motor (afbeelding 6) bevat een rotor-as, compressor en turbine gecombineerd in een enkel monolithisch silicium-nitride onderdeel. De oppervlaktekwaliteit van de rotorgroep is belangrijk omdat de sterkte van keramische onderdelen erg afhankelijk is van de oppervlaktegesteldheid. Er dient dan ook opgemerkt te worden dat de geometrie van de rotor geen voor-bewerkingen toestaat, zoals slijpen als gevolg van de complexe vorm. Met andere woorden er is een fabricage-proces noodzakelijk dat een keramisch, complex gevormd onderdeel met een goede oppervlaktegesteldheid kan produceren. Dit is een vereiste om deze onderdelen voor de microgasturbine te kunnen bouwen

Sinds kort worden silicium-nitride miniaturturbines gebouwd met gebruikmaking van Mould SDM en getest met lucht op kamertemperatuur (zie afbeelding 7). De testresultaten laten zien dat de microturbine met een snelheid tot 460.000 rpm draaide. Neem daarbij in aan-



Afbeelding 4. Mould SDM-procedures

merking dat de turbine was ontwikkeld voor een gas met een hoge temperatuur, met een snelheid hoger dan het geluid en met meer interne energie, dan is het resultaat gunstig en bemoedigend [4].

Schaalimplicaties voor brandstofcellen

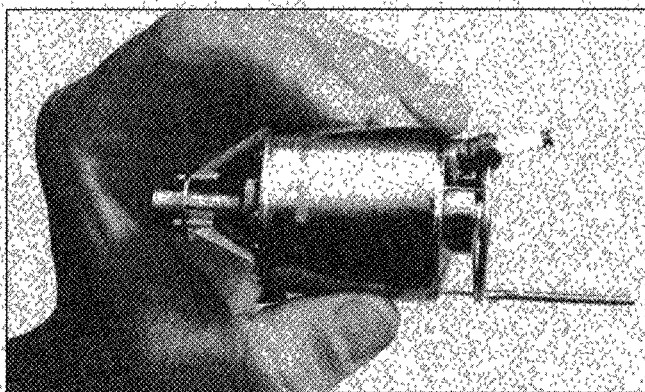
Een brandstofcel is een elektrochemische inrichting of hulpmiddel waarmee elektrische stroom direct via chemische reacties wordt verkregen. De basisbenodigdheden bestaan uit een ionengeleidend elektrolytisch membraan gelegen tussen twee elektroden omsloten door brandstof en stroomafnemers (zie afbeelding 8). Een katalysator op een van de elektroden versterkt de scheiding van ionen en elektronen aan de brandstofzijde. Alleen de ionen verspreiden zich door het elektrolyt en recombineren met elektronen aan de oxiderende zijde. De elektronen verspreiden zich via een extern circuit en voorzien daarmee in het elektrische vermogen.

In het ideale geval zal de brandstofcel (of verzameling cellen) evenveel stroom leveren als door de externe belasting wordt vereist, waarbij bovendien de spanning constant blijft. In de realiteit ontstaat er echter een span-

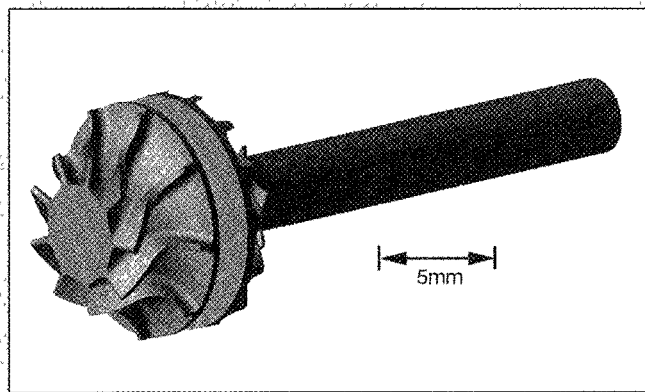
ningsverlies dat toeneemt bij een hogere belastingsstroom, zoals de typische stroom/spanningsgrafiek in afbeelding 9 ons laat zien.

Een hoog renderende brandstofcel is er een die hoge piekvermogens en hoge stroomdichtheden kan leveren met een minimaal spanningsverlies. De verliezen komen hoofdzakelijk voort uit activeringsbegrenzings bij lage stroomdichtheden, ohmse verliezen bij gemiddelde stroomdichtheden en reactieve transportbegrenzings bij hoge stroomdichtheden. Het fundamentele punt van belang voor de miniaturisering van een brandstofcel is het effect van de gemiddelde vermogensdichtheid van het component. Er zijn twee standaardbenaderingen om de schaalimplicaties voor brandstofcellen te bestuderen, waarbij wordt aangenomen dat de maximale vermogensdichtheid als primair criterium geldt.

De eerste directe vraag is of miniaturisering geometrisch gezien voordelen heeft voor de vermogensdichtheid in termen van het aantal watt per eenheid van oppervlakte. In dit artikel is het speerpunt de oppervlakte/volume-verhouding voor erg kleine brandstofcellen.



Afbeelding 5. M-DOT microgasturbinemotor.



Afbeelding 6. Het CAD-model van de silicium-nitride rotorgroep van de microgasturbinemotor. De turbinediameter bedraagt 12 mm. De maximale bladtop heeft een dikte van 220 μm . Het onderdeel is ontworpen om met een snelheid van 800.000 rpm te draaien.

De tweede en zeker niet minder belangrijke beschouwing is de mate waarin de kleinere afmetingen ook daadwerkelijke fundamentele voordelen opleveren in termen van stroom/spanningseigenschappen door van invloed zijnde factoren zoals kinetische en stromingsmechanismen en warmteoverdracht. Het onderstaande voorbeeld gaat in op enkele specifieke gevallen.

Vermogensdichtheid en geometrische beschouwingen

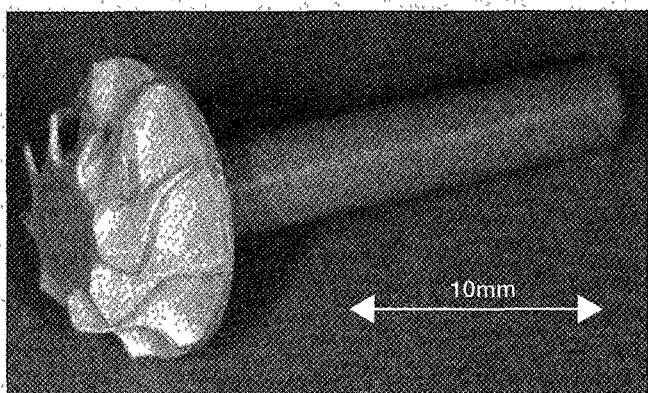
De meeste brandstofcellen beschikken over microporeuze elektroden gescheiden door een elektrolytische laag. Dit ontwerp is vooral geschikt voor continue fabricage. Enkele ontwerpen van vaste brandstofcellen hebben zowel cilindrische als geribbelde vormen, hoofdzakelijk afhankelijk van de toegepaste fabricage- en bedrijfs-overwegingen [5]

Het principe van niet-planaire interfacelagen kan worden uitgebreid met als gevolg een aanzienlijke verbetering van de oppervlakte/volumeverhouding, vooral als het gaat om haalbare microgefabriceerde afmetingen. In afbeelding 10 wordt een conventioneel planair ontwerp

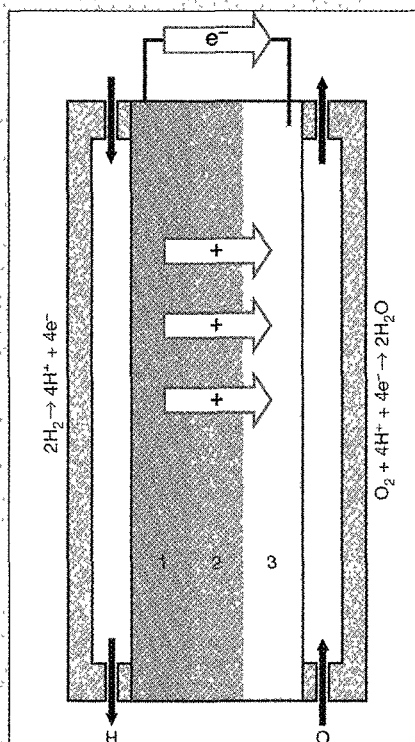
vergeleken met een driedimensionale interface. Het 3D-ontwerp zorgt voor extra ruimte voor de elektrolytische interface door gebruik te maken van verticale oppervlakken. Dergelijke mesoschaaleigenschappen, in de orde van 10 tot 100 μm , vullen de reeds beschikbare oppervlakken van de microporeuze en nanoporeuze oppervlakken aan, die al aanwezig zijn in de gasdiffusie-elektroden zelf.

De toevoeging van een hoogtecomponent verhoogt het totale volume van het component in vergelijking met een absoluut planair ontwerp. Het laten toenemen van de hoogte door het aanbrengen van oppervlaktestructuren verhoogt het volume met slechts een geringe hoeveelheid. Dit omdat het continu verlagen van de kenmerkende breedten weliswaar het oppervlak doet toenemen, maar geen invloed heeft op het volume.

De uitbreiding waarmee het beschikbare gebied, de ruimte, kan worden uitgebreid is slechts begrensd door de minimale kenmerken die vereist zijn voor de functionaliteit en de fabriceerbaarheid. Dienovereenkomstig zijn er dus begrensde ontwerpregels en kritische afmetingen, zoals die ook bestaan voor de fabricage van geïnte-



Afbeelding 7. De gesinterde microturbiné zoals die is gebruikt voor de spintest.



Afbeelding 8. Het principe van de brandstofcel.

- 1 anode
- 2 membraan
- 3 kathode

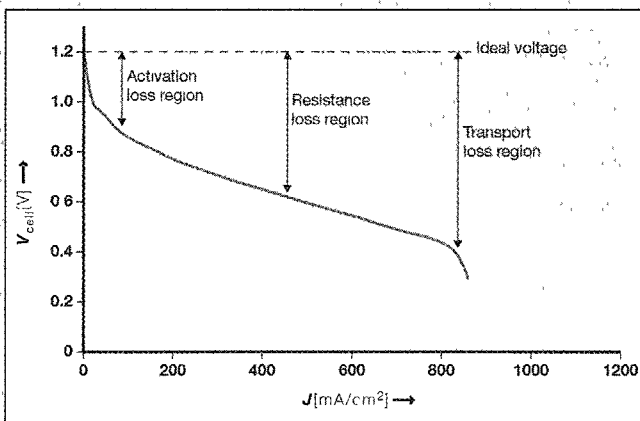
greerde schakelingen (IC's) De typische afmetingen, zoals al gebruikelijk bij polymeer elektrolytische brandstofcellen, bieden belangrijke mogelijkheden om verbeteringen aan te brengen. Kritische afmetingen, zo is algemeen de verwachting, zullen afnemen als de ontwikkeling van de miniaturisering van de brandstofceltechnieken zich verder doorzet. Deze snelle ontwikkelingen herinneren ons aan de succesvolle verkleining van de geïntegreerde schakelingen in de halfgeleiderindustrie. Afbeelding 11 toont een voorbeeld waarbij de parameters zijn gerealiseerd met de al beschikbare techniek.

Vermogensdichtheid en prestatiebeschouwingen

De stromingsweerstand is een belangrijke miniaturisatieparameter. In stroomkanalen is het drukverlies omgekeerd evenredig aan de hydraulische diameter, die wederom varieert met de kanaalgrootte (zie afbeelding 12). Een tweede belangrijke parameter is gasdiffusie. In brandstofcellen wordt het transport van reactiecomponenten naar de elektrolytische interface gestuurd door de diffusie van gasmoleculen door de poreuze elektroden.

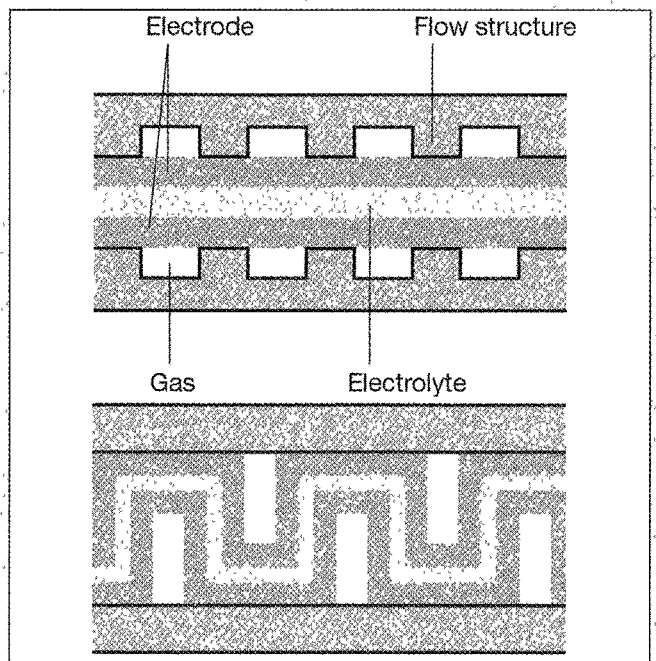
Een specifiek voordeel van microbewerkte stromingsstructuren is het feit dat het aantal niet-bewerkbare gebieden kan worden beperkt. Dit verbetert de totale prestaties van de gasdiffusie door de poreuze elektroden. Afbeelding 13 geeft weer hoe de gereduceerde kanaalgrootte over hetzelfde elektrische contactgebied (50 % in dit geval) beschikt over kleinere afgesloten regio's en meer uniform gedistribueerde mechanische ondersteuning.

Een ander belangrijk kenmerk van brandstofcellen is de elektrische weerstand. Een lage elektrische weerstand is wenselijk in verband met een hoog rendement van de energie-omzetting in de brandstofcel. De elektrische weerstand R is proportioneel met de weglengte L en omgekeerd evenredig aan de doorsnede van het gebied A . De weerstand van een materiaal is over het algemeen niet afhankelijk van de grootte, tenzij de afmetingen de atomaire schaal benaderen. Een voordeel van een miniatuurontwerp is dat de verbindingen tussen de seriegeschakelde cellen meestal korter zijn dan in hun in het groot uitgevoerde tegenhangers. Het is echter ook weer zo dat de uniforme afname van de grootte in alle dimensies vaak resulteert in een hogere elektrische weerstand,



Afbeelding 9. De typische I/V-prestatielijnie van een brandstofcel.

V_{cell} Celspanning
 J Stroomdichtheid



Afbeelding 10. De planaire cel (boven) versus de 3D-configuratie. Elektrode aangebrachte structuur gas elektrolyt

omdat de weerstand omgekeerd evenredig is aan de lengte in het kwadraat.

Miniaturisering biedt echter wel een subtiel voordeel ten aanzien van kortere verbindingspaden. Brandstofcellen beschikken over twee gemeenschappelijke configuraties monopolaire en bipolaire (zie afbeelding 14). De bipolaire constructie is vrijwel eenduidig geadopteerd als het gaat om de automobiellindustrie en de applicaties waarin grotere cellen worden toegepast. Dit alleen vanwege de eenvoudige constructie. De monopolaire versie is echter fundamenteel gezien compacter, omdat een enkele brandstofkamer twee anodes bedient en een oxidatiekamer twee kathodes bevat.

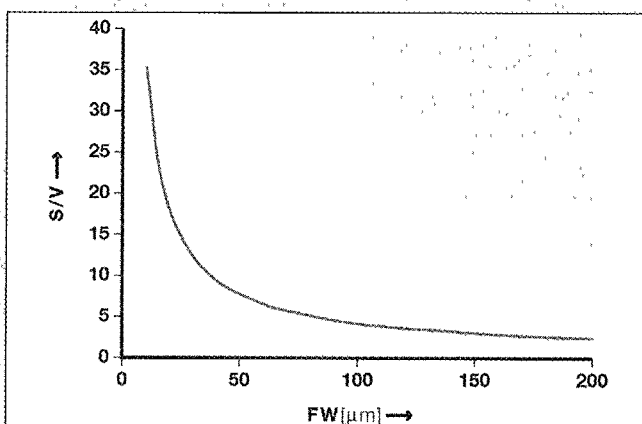
Het monopolaire ontwerp beschikt echter over een nadeel als het gaat om een vergelijking te trekken naar grotere systemen omdat de elektrische stroom lateraal over de elektroden moet stromen; in een miniatuursysteem is deze afstand aanzienlijk kleiner. Vandaar dat een kleiner systeem de optie openlaat voor het toepassen van een compact ontwerp met gebruikmaking van een monopolaire gestapelde uitvoering.

Miniaturisering biedt een voordeel ten aanzien van kortere verbindingspaden

Brandstofcelfabricage

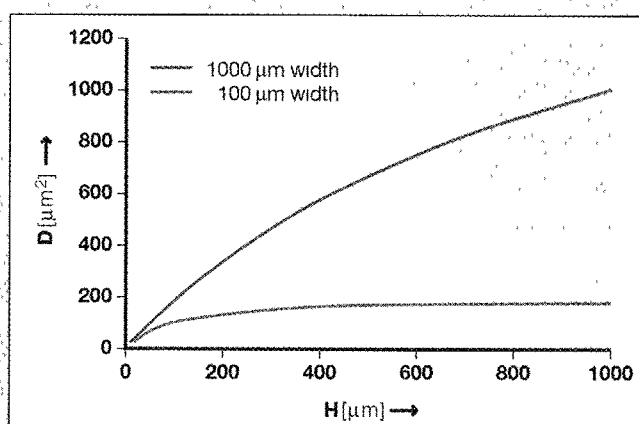
Het zogenoemde diepe silicium etsproces (zie afbeelding 15) laat hoge geometrische complexiteit tegen vrijwel minimale kosten toe. Dit is in sterk contrast met de conventionele fabricageprocessen, zoals bewerken.

De fundamentele eisen voor het elektrodemateriaal zijn een grotere oppervlakte voor de ondersteuning van het katalysatieproces, een hoge elektrische geleiding en een uniforme gasdiffusie. Het concept van een mesoscopische 3D-interface voegt daaraan de niet zo triviale voorwaarden van de definitie van het aanbrengen van structuren



Afbeelding 11. Een genormaliseerde oppervlakte/volumeverhouding (S/V) versus kenmerkende breedte (FW=feature Width) voor een gerimpelde brandstofcel.

De elektrolytische dikte bedraagt $60 \mu\text{m}$, de elektrodedikte $80 \mu\text{m}$, de flow backing $500 \mu\text{m}$. De afbeelding laat zien dat voor een erg kleine kenmerkende grootte een aanzienlijke verbetering van de oppervlakte/volumeverhouding wordt verkregen met gerimpelde kenmerken. (De genormaliseerde oppervlakte/volumeverhouding is gedefinieerd als de oppervlakte/volumeverhouding van een van oppervlaktestructuur voorziene cel gedeeld door die van de planaire tegenhanger.)



Afbeelding 12. Hydraulische diameter (D) versus de kanaalhoogte (H) voor een tweekanaals-breedte. Een grotere hydraulische diameter is in overeenstemming met de gewenste condities, zijnde de lagere drukverliezen. Het verbreden van het kanaal (1000 μm) is in dit voorbeeld aan te raden. Het is interessant te zien dat de schaalgrootteverhouding dicteert dat D relatief gezien ongevoelig voor H wordt op het moment dat deze de breedte van 100 μm overschrijdt.

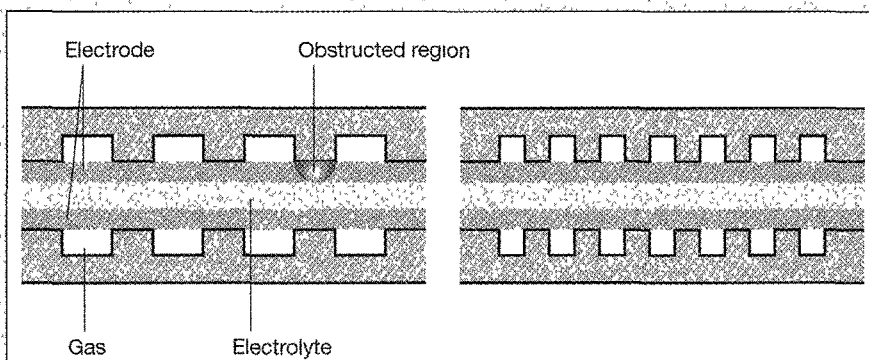
toe Verschillende alternatieven zijn onderzocht om een goed controleniveau van het fabricageproces te verkrijgen. Initiële studies omvatten onder andere plasma-sputten, galvanisering met een oplossend materiaal en het aanbrengen van vervormbare pastalagen. De grootste uitdaging vormt wel de controle over de poreusheid van het materiaal.

Een nieuwe techniek genaamd micro-mould metal gel-casting is toegepast voor het verkrijgen van de patroonbevattende microporeuze eigenschappen, die voordien met andere methoden onhaalbaar was. In deze techniek wordt gebruikgemaakt van een metaalpoeder dat fijn verdeeld in een oplossing is ondergebracht en daarmee een gel vormt die vervolgens in een voorgedefinieerde vorm wordt gegoten. Na ontbinding wordt het metalen groene deel onder voor poreusheid en massasterkte geoptimaliseerde condities gesinterd. Geëtste silicium moulds (vormstukken) evenals andere fotolithografisch gebaseerde moulds worden gebruikt voor het realiseren van de microporeuze zilveren elektroden met structuurkenmerken in de orde van 100 µm, zoals in afbeelding 16 is te zien. Modellen met een structuur van 25 µm zijn op deze wijze via silicium moulds reeds gerealiseerd.

De mogelijkheid om willekeurige patronen op elektroden met een gecontroleerde poreusheid te krijgen heeft niet alleen voordelen voor het 3D-interface-ontwerp, maar levert bovendien de gelegenheid om functionaliteit mee te integreren om de stromingsdistributie te optimaliseren. Deze ontwerpvrijheid geeft de mogelijkheid tot het vinden van oplossingen gericht op het verbeteren van de kritische eigenschappen, zoals stromingsweerstand en een niet-uniforme diffusie.

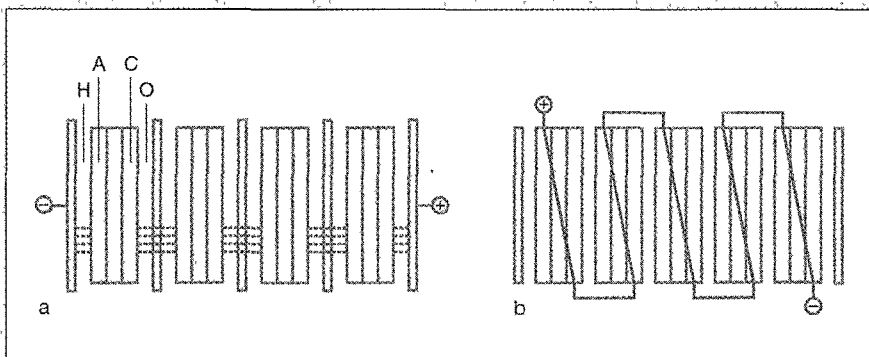
Van theorie naar praktijk

Hoewel er een aanzienlijke vooruitgang op alle fronten is geboekt, valt er op empirisch gebied nog veel werk te verzetten. Zoals aangegeven vormen vorderingen in fabricagetechnieken een kritische factor in het vervaardigen van prototypen, zoals bijvoorbeeld de hiergenoemde turbine en de componenten voor de brandstofcel. Naast andere inspanningen op dit gebied werkt ABB nauw samen met Stanford University in het onderzoek naar de voordelen van kennis op het gebied van miniaturisering (downscaling) en in de studie naar de toepassing in industriële applicaties.



Afbeelding 13. Micro-bewerking maakt het mogelijk om het aantal niet-bewerkbare gebieden te reduceren door verkleining van de afzonderlijke contactoppervlakken (rechts).

Elektrode afgesloten regio gas elektrolyt



Afbeelding 14. Bipolaire (a) versus monopolair (b) gestapelde brandstofcelconfiguraties.

- A. anode
- C. kathode
- H. water
- O. zuurstof

Auteurs:

Sangkyun Kang - Rapid Prototyping Laboratory, Stanford, CA 94305-3030, USA, kangsk@stanford.edu;

Sang-Joon John Lee, PO Box 19760, Stanford, CA 94309, USA, sang-joon.lee@stanford.edu;

Fritz B. Prinz, Rapid Prototyping Laboratory, Stanford, CA 94305-3030, USA, fbp@cdr.stanford.edu.

ABB en Stanford University werken nauw samen op een aantal gebieden. In dit artikel gaan professor Prinz, R.H. Adams, Professor of Engineering in the Department of Mechanical Engineering and Materials Science and Engineering en zijn collega's in op nieuwe zogenoemde downscaled fabricagetechnieken. Deze technieken hebben impact op de ontwikkeling van producten van ABB. Gezamenlijke projecten zijn gestart om de voordelen van de op Stanford uitgedachte technieken op het gebied van industriële sensing te exploiteren.

Bronnen:

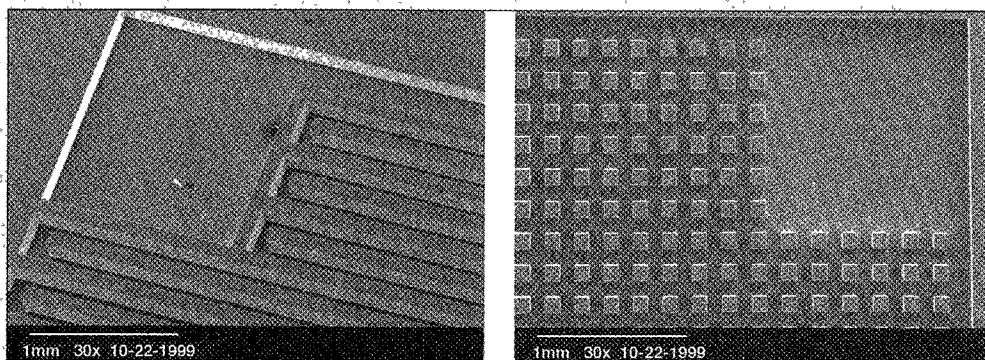
[1] G.T. Casanady: Theory of Turbomachines, McGraw-Hill, New York, 1965.

[2] <http://www.pratt-whitney.com/engines/commercial.html>.

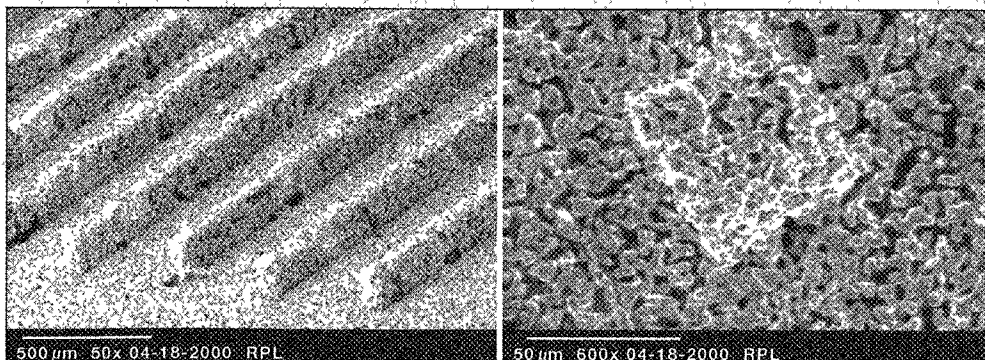
[3] A.G. Cooper, et al: Fabrication of structural ceramic parts using Mold SDM. Proceedings of the American Ceramics Society meeting, Cocoa Beach, Florida, USA, January. 2000

[4] S. Kang, et al: Application of the Mold SDM process to the fabrication of ceramic parts for a micro gas turbine engine. Proceedings Ceramic Materials and Components for Engines, edited by J.G. Heinrich, Germany, June 2000.

[5] N.G. Minh: Ceramic Fuel Cells. Journal of the American Ceramic Society, 76.3 (1993).



Afbeelding 15. Voorbeelden van de stromingsstructuren in silicium met een 100µm-kanaal. De kanaalgrootten variëren van 200 µm tot 50 µm en zijn reeds gerealiseerd op cellen met een oppervlakte van 1 cm². Gemiddeld worden zestien of meer cellen simultaan gefabriceerd om iedere silicium wafer van 100 mm.



Afbeelding 16. Microporeuze elektroden geproduceerd door gebruik te maken van een metaalgel (gietwerk).